Suspensión de la producción de material fisionable

Un alto en la producción de ciertos componentes de las armas nucleares resultaría muy fácil de verificar. Contribuiría a un control más estrecho de los arsenales almacenados por norteamericanos y soviéticos

Frank von Hippel, David H. Albright y Barbara G. Levi

Pronto será imposible que se alcancen acuerdos sobre el control de las armas nucleares basados, como los SALT II, en recuentos verificables del número de misiles y de otros ingenios de guerra. La vulnerabilidad de las armas estratégicas como consecuencia de la precisión de los sistemas de guía remota ha estimulado el giro hacia el desarrollo de misiles balísticos pequeños y móviles, como el Midgetman presentado por los Estados Unidos, de casi imposible detección. Los misiles crucero y otras armas nuevas se han diseñado dotadas de capacidad para transportar explosivos convencionales y nucleares, impidiendo así un cómputo exacto del número de ojivas dispuestas para su lanzamiento.

Se necesita, pues, un nuevo enfoque que complemente los métodos de recuento del número de vehículos capaces de transportar armas nucleares. Para ello, sugerimos una nueva lectura de una de las más antiguas propuestas sobre restricción del crecimiento de los arsenales nucleares: un acuerdo que suspenda la producción de las materias fisionables necesarias para la fabricación de esa clase de armamento.

Cada arma nuclear contiene como mínimo algunos kilogramos de materia fisionable capaz de reaccionar en cadena. La fisión de un kilogramo de uranio 235 destruyó Hiroshima. Nagasaki fue arrasada por la fisión de un kilogramo de plutonio 239. El desarrollo de las bombas termonucleares o "bombas de hidrógeno" durante los inicios de la década de los 50 no eliminó la necesidad de los materiales fisionables, ya que tales armas requieren una explosión de fisión previa que desencadene la reacción de fusión del hidrógeno.

Por ser la materia fisionable un ingrediente esencial de todas las armas nucleares, la suspensión de su producción significaría un límite máximo en el número de tales ingenios que podrían fabricarse. Por tanto, desde la invención de las armas nucleares, las propuestas de una suspensión de la producción de materias fisionables han estado en el orden del día de las conversaciones internacionales sobre control de armamento.

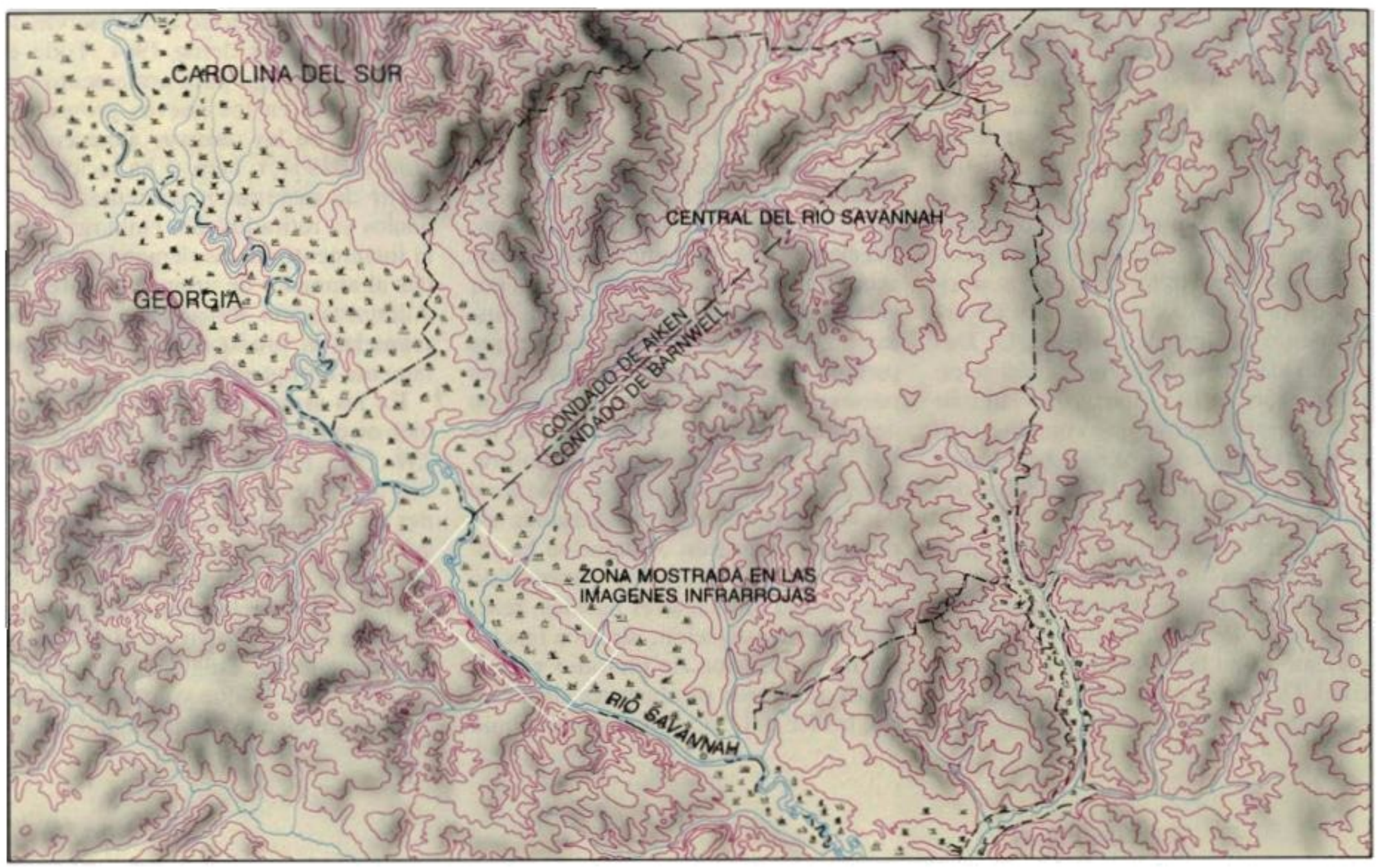
Entre 1956 y 1969, los EE.UU. plantearon repetidamente esta interrupción como una opción independiente para el control de armamentos. Las respuestas por parte soviética no fueron muy alentadoras, quizá porque en aquella época el número de cabezas nucleares de la URSS era considerablemente inferior al norteamericano. Sin embargo, al comienzo de los 80, ambos arsenales eran ya equiparables, y en 1982 el ministro ruso de Asuntos Exteriores Andrei Gromyko indicaba que "el corte de la producción de materias fisionables destinadas a la elaboración de armas nucleares" podía constituir una de las etapas iniciales de un programa de desarme nuclear.

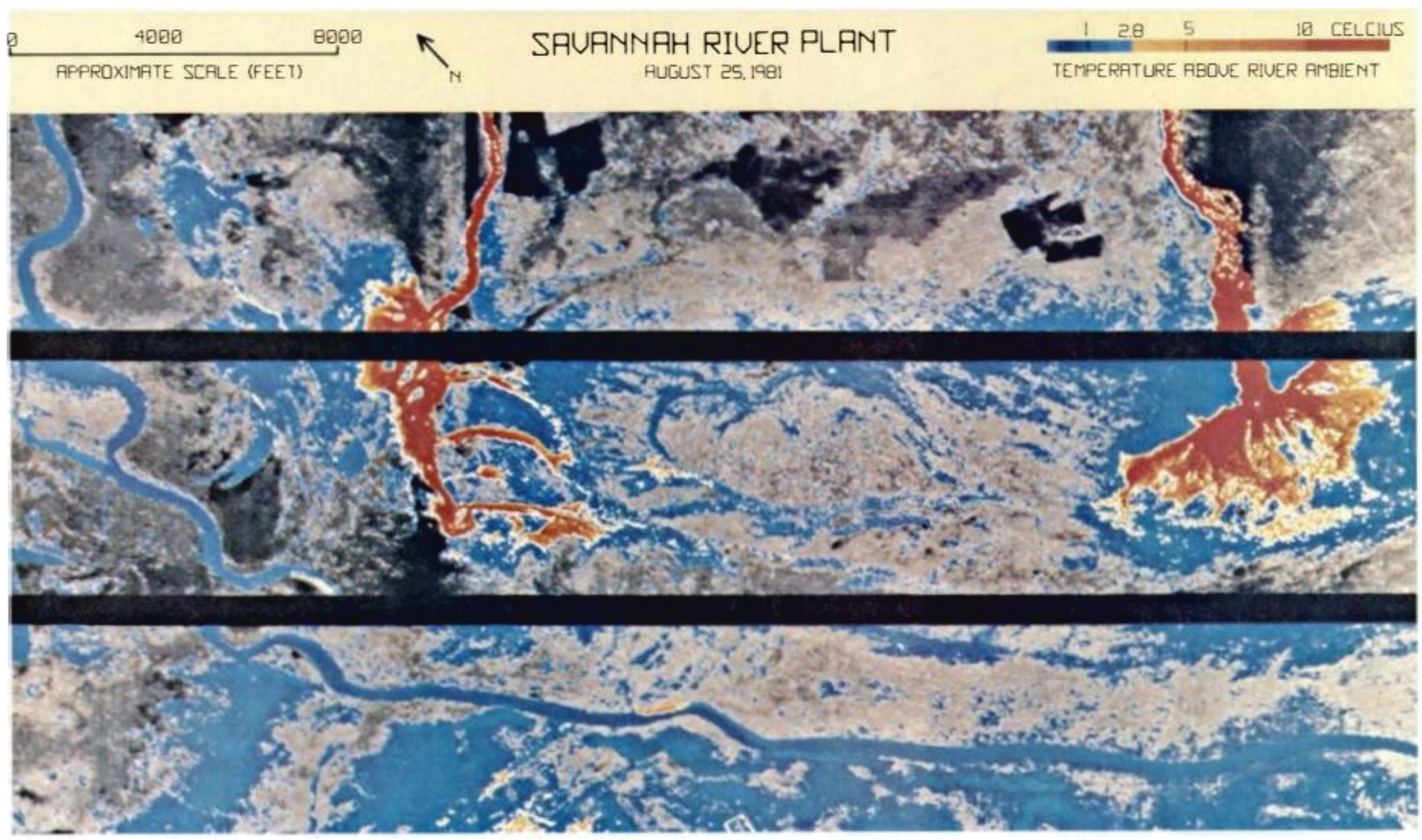
La suspensión de la producción de materias fisionables entraría, pues, a formar parte de cualquier paquete más ambicioso de propuestas de desarme y de refuerzo mutuo del control de armamento. En este orden, para que tenga sentido cualquier acuerdo que congele o reduzca el número de cabezas nucleares, debe aportar garantías sobre la interrupción de la producción de nuevas cabezas nucleares.

Suspensión que serviría, además, para otro propósito. La continua producción de materias fisionables destinadas a armamento nuclear por parte de las superpotencias pone en entredicho sus esfuerzos para desalentar la realización de actividades parecidas por parte de otras naciones. Durante los años 50 y 60, las propuestas de los EE.UU. para la interrupción de la producción de materias fisionables iban a menudo ligadas a los esfuerzos por persuadir a los estados no nuclearizados de que dieran soporte al Tratado de no proliferación. Este tratado entró en vigor en 1970 y, desde entonces, ha sido firmado por más de 100 estados. Que los EE.UU y la URSS, naciones inspiradoras del tratado, no hayan conseguido controlar su carrera de armamentos ha provocado reacciones de insatisfacción del tratado cada vez más fuertes por parte de los estados sin armas nucleares, expresadas durante las conferencias de revisión de los años 1975 y 1980. La tercera conferencia de revisión, correspondiente al año en curso, se ha encontrado con dificultades mayores.

Un acuerdo de las superpotencias que detuviera la producción de materias fisionables apropiadas para armamento nuclear abarcaría tanto los intereses de la no proliferación como los del control de armamento. Nos proponemos exponer aquí algunos de los fundamentos técnicos necesarios para una discusión pública constructiva de la posibilidad de tal suspensión.

Para iniciar semejante análisis hay que empezar por conocer la naturaleza y la disponibilidad de los propios materiales fisionables. El uranio 235 es el único isótopo fisionable que existe en la naturaleza en cantidades apreciables. Sin embargo, no se encuentra en una forma que pueda usarse directamente en la elaboración de las armas nucleares. De una muestra típica de uranio natural, sólo el 0,7 por ciento es U-235. El 99,3 por ciento restante es uranio 238, isótopo más pesado que no puede experimentar una reacción en





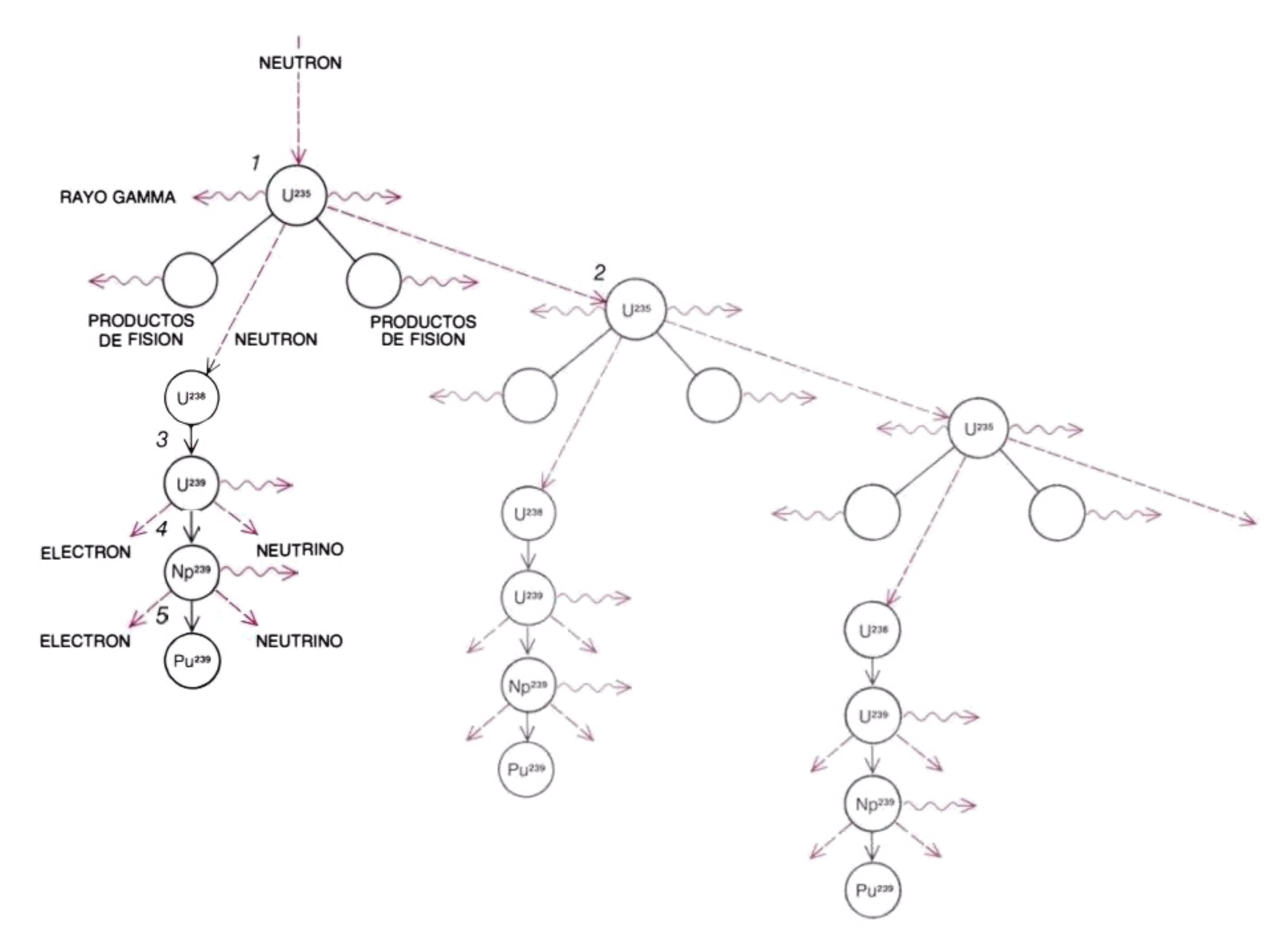
1. IMAGENES EN EL INFRARROJO TERMICO ayudarían al control del cumplimiento de una prohibición de la producción de materias fisionables con fines militares. Las fotografías que se muestran aquí revelan los vertidos de agua caliente procedentes de dos reactores productores de plutonio en el río Savannah. En la representación en falso color, los cauces de agua caliente van en rojo y en naranja; el fondo más frío se representa en azul y en gris. Los cauces tienen aproximadamente 100 metros de ancho hasta llegar a una marisma, donde uno de ellos se disemina en un delta de 1500 metros de ancho. Estas imágenes fueron tomadas desde un avión que volaba a una altitud de 1,2 kilómetros. Imágenes similares obtenidas desde satélites podrían detectar reactores ocultos.

cadena. Para formar parte de una arma práctica hay que enriquecer el uranio hasta que contenga como mínimo un 20 por ciento de U-235. El uranio apropiado para el armamento nuclear de los EE.UU. contiene más del 90 por ciento de U-235.

Una de las técnicas mediante las que se consigue este grado de enriquecimiento se desarrolló durante los albores de la historia del programa de armamento nuclear de los EE.UU. Denominada difusión gaseosa, consiste en la difusión de hexafluoruro de uranio (compuesto gaseoso que contiene uranio) a través de una sucesión de miles de barreras porosas. Durante las décadas de los años 40 y 50 los EE.UU. construyeron tres plantas de enriquecimiento por difusión en Tennessee, Kentucky y Ohio. Al comienzo de la década de los 60, durante el período máximo de la producción de los EE.UU., estas instalaciones produjeron unas 80 toneladas métricas anuales de uranio para armamento nuclear, suficientes para abastecer miles de armas.

En 1964, los EE.UU. disponían de tantas existencias de material fisionable que el presidente Lyndon B. Johnson decidió detener la producción, aduciendo que "ni siquiera a falta de acuerdo debemos almacenar armas por encima de nuestras necesidades ni buscar un exceso de poderío militar que pudiera resultar tan provocativo cuan ruinoso". Desde entonces, el complejo de enriquecimiento de uranio de los EE.UU. ha producido sobre todo uranio "bajamente enriquecido", que sirve de combustible para la mayoría de reactores nucleares. Aunque se ha fabricado uranio altamente enriquecido para su uso en reactores navales, reactores de investigación, algunos reactores de producción de plutonio y unos pocos reactores productores de energía, los EE.UU. no han añadido uranio altamente enriquecido a sus reservas de armas nucleares desde 1964. Todo el uranio apropiado para armamento nuclear usado en los nuevos proyectiles proviene de las reservas almacenadas antes de 1964, o bien se ha reciclado a partir de materias procedentes de ingenios ya retirados. Sin embargo, ante el incremento de las demandas asociadas al aumento de armas nucleares, la Administración Reagan ha propuesto reanudar la producción de uranio altamente enriquecido.

En las armas nucleares se usa también otro isótopo fisionable, el plutonio 239. Para formar Pu-239, se bombardea una muestra de U-238 con neutrones en un reactor nuclear [*véase la figura 2*]. Básicamente, los reactores productores de plutonio no difieren de los reactores de las centrales productoras de energía salvo en el fin de su funcionamiento, dirigido a la producción de plutonio que contenga más de un 93 por ciento del isótopo Pu-239,



2. REACCION DE FISION EN CADENA que produce plutonio 239 a partir de uranio 235. Al bombardear un átomo de uranio 235 con un neutrón (*1*), se producen átomos de masas intermedias, llamados productos de la fisión, y dos o tres neutrones adicionales. Un neutrón bombardea a otro átomo de uranio 235 (*2*), manteniendo la reacción. Otro es absorbido por un átomo de U-238, convirtiéndolo en U-239 (*3*). El uranio 239 se desintegra en neptunio 239 emitiendo un electrón y un neutrino (*4*). Se produce plutonio 239 cuando el neptunio 239 emite un electrón y un neutrino (*5*). (Esquema de Allen Beechel.)

apropiado para armamento nuclear. Este no es el único grado de enriquecimiento con el que se pueden dotar las armas nucleares, pero es el más idóneo frente a otros grados que contienen porcentajes superiores de isótopos de plutonio más pesados. En los modernos y compactos ingenios nucleares, se prefiere el Pu-239 al U-235, ya que, para producir la explosión de fisión, se necesita una cantidad menor de material: sólo unos pocos kilos.

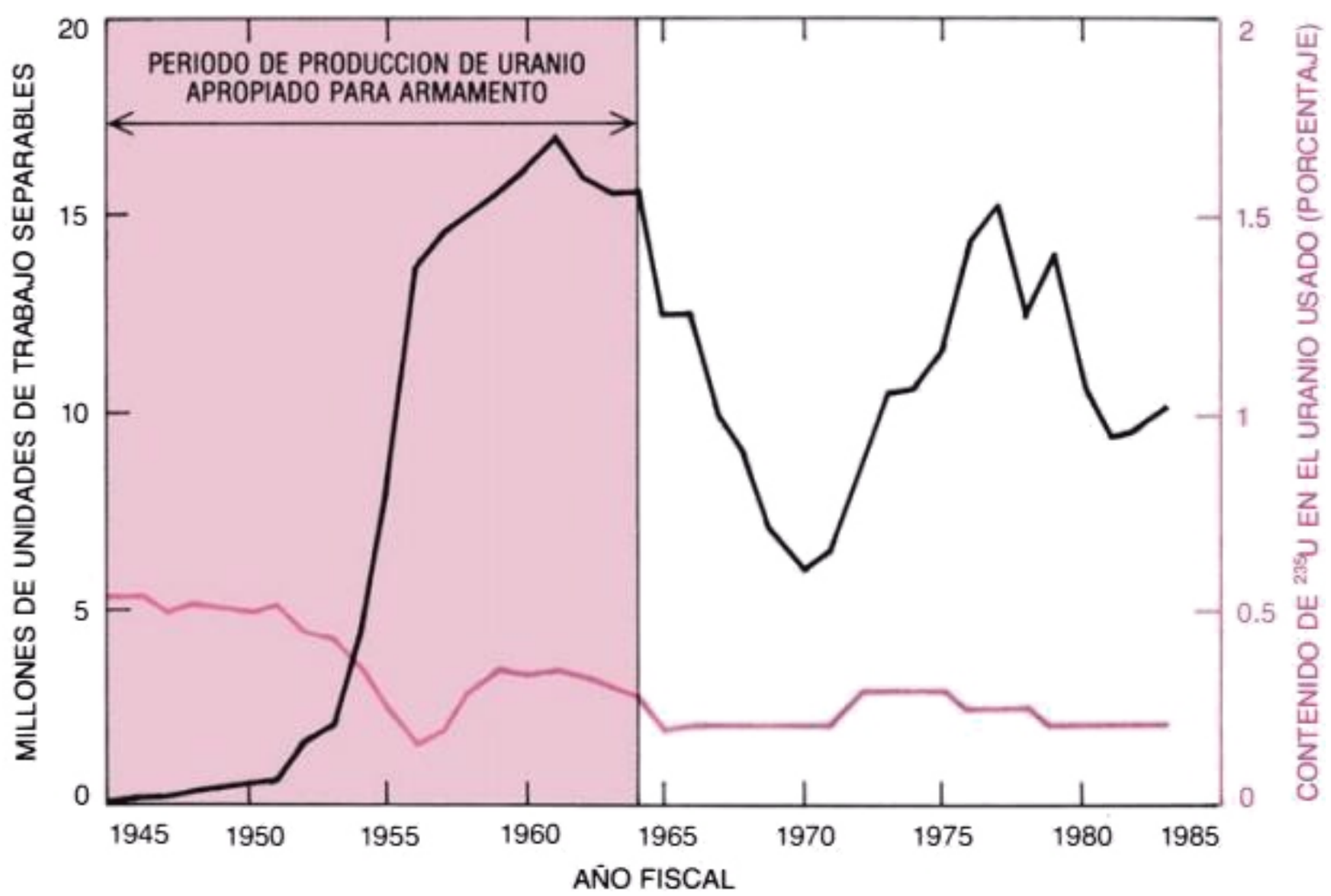
Durante buena parte del tiempo comprendido entre 1955 y 1964, los EE.UU. mantuvieron en rendimiento 13 reactores fabricadores de plutonio: ocho en Hanford, Washington, y cinco en la zona del río Savannah, Carolina del Sur. Producían en total más de seis toneladas anuales de plutonio, suficientes para abastecer más de 1000 cabezas nucleares.

A lo largo de los ocho años que siguieron a la decisión del presidente Johnson, se fueron cerrando todos los reactores de Hanford y se desactivaron dos de los cinco del río Savannah. Los otros tres siguen funcionanado, junto con un nuevo reactor "ambivalente", cuya construcción terminó en 1964 en Hanford, que genera energía eléctrica y produce plutonio.

Con los nuevos planes de la Administración de producir más de 10.000 nuevas y compactas cabezas nucleares, se han promovido varios proyectos para avivar el ritmo de crecimiento de las reservas de plutonio con fines militares de los EE.UU. Estos proyectos pondrán en marcha de nuevo uno de los reactores del río Savannah desactivados y convertirán en plutonio apropiado para armamento nuclear alguna de las 17 toneladas de plutonio para combustible y para reactores del Departamento de Energía.

¿Cuánto material fisionable almacenan en reserva los EE.UU. y la URSS? Al alcance del público hay suficiente información para permitirnos aventurar estimaciones razonables de las reservas de los EE.UU.; muchísimo menos, en cambio, se sabe del complejo productor de armamento soviético. Sólo nos es dada una estimación aproximada del tamaño de sus reservas de plutonio y apenas los datos públicos rusos nos dejan entrever sus reservas de uranio con fines militares.

De acuerdo con los datos del Departamento de Energía, los EE.UU. han comprado, desde 1944, unas 250.000 toneladas de uranio natural, que supondrían unas 1800 toneladas de U-235. La mejor forma de calcular cuánto de este uranio 235 se ha dedicado a armamento consiste en examinar los comunicados del gobierno que cifran el volumen anual del "trabajo de separación" o de enriquecimiento realizado en el complejo enriquecedor de los EE.UU. y los porcentajes de U-235 desechados en el "uranio usado", subproducto del proceso de enriquecimiento. Utilizando estos datos estimamos que los EE.UU. podrían haber producido aproximadamente 750 toneladas de uranio altamente enriquecido apropiado para armamento nuclear antes del cese de la producción en 1964. Tras estimar las demandas de enriquecimiento de uranio no relacionadas con el armamento a lo largo de 1964 y ulteriores exigencias de uranio altamente enriquecido, llegamos a la conclusión de que en el arsenal de los EE.UU. hay un mínimo de 500 toneladas de uranio para armamento. Thomas B. Cochran y Milton M. Hoenig, del Consejo Nacional de Recursos para la Defensa, han arribado a una cifra semejante.



3. HISTORIA DEL ENRIQUECIMIENTO DEL URANIO de los EE.UU. Nos ayuda a ofrecer una estimación de la cantidad de materias fisionables almacenada. La actividad del enriquecimiento, ilustrada en negro, se mide en SWU (Separative Work Units). El número de SWU viene a ser proporcional a la energía consumida al entresacar el U-235 del U-238. Estos datos, junto con el porcentaje de "uranio usado" (material desechado después de haberle extraído la mayor parte del U-235) que fue U-235 (*color*), indican que los EE.UU. podrían haber producido unas 750 toneladas métricas de uranio altamente enriquecido antes de la suspensión decretada en 1964. El incremento en la actividad de enriquecimiento que empezó a comienzos de la década de los 70 no se debió a la producción de uranio altamente enriquecido con fines militares, sino al incremento de la producción de uranio de bajo enriquecimiento destinado a las centrales de energía.

La cantidad de plutonio de las reservas de los EE.UU. puede estimarse con los datos que acaba de revelar el Departamento de Energía, relativos a la energía térmica generada en sus reactores productores de plutonio desde 1951. La energía térmica producida es directamente proporcional a la cantidad de U-235 que se ha fisionado en estos reactores, que a su vez es proporcional a la cantidad de plutonio obtenida. (De cada kilogramo de U-235 fisionado vienen a salir unos 0,9 kilogramos de plutonio.) Con esta base concluimos que las reservas de los EE.UU. contienen aproximadamente 100 toneladas de plutonio. Cochran y Hoenig han llegado también a una evaluación parecida.

Aunque no se han facilitado datos referentes a las cantidades de plutonio y de uranio altamente enriquecido apropiados para armamento fabricado en la URSS, ni por su gobierno ni por el de los EE.UU., la producción soviética de plutonio puede calcularse a partir de la cantidad de kryptón 85 radiactivo que se ha acumulado en la atmósfera. Este isótopo, que se produce por fisión, lo expulsan las instalaciones que reprocesan el combustible nuclear. También se liberan cantidades bastante pequeñas de este isótopo durante las pruebas de armas nucleares y a través de las fugas del combustible de un reactor. Por no ser químicamente reactivo, el Kr-85 se acumula en la atmósfera, donde se distribuye de un modo casi uniforme dada su larga vida media radiactiva (unos 11 años).

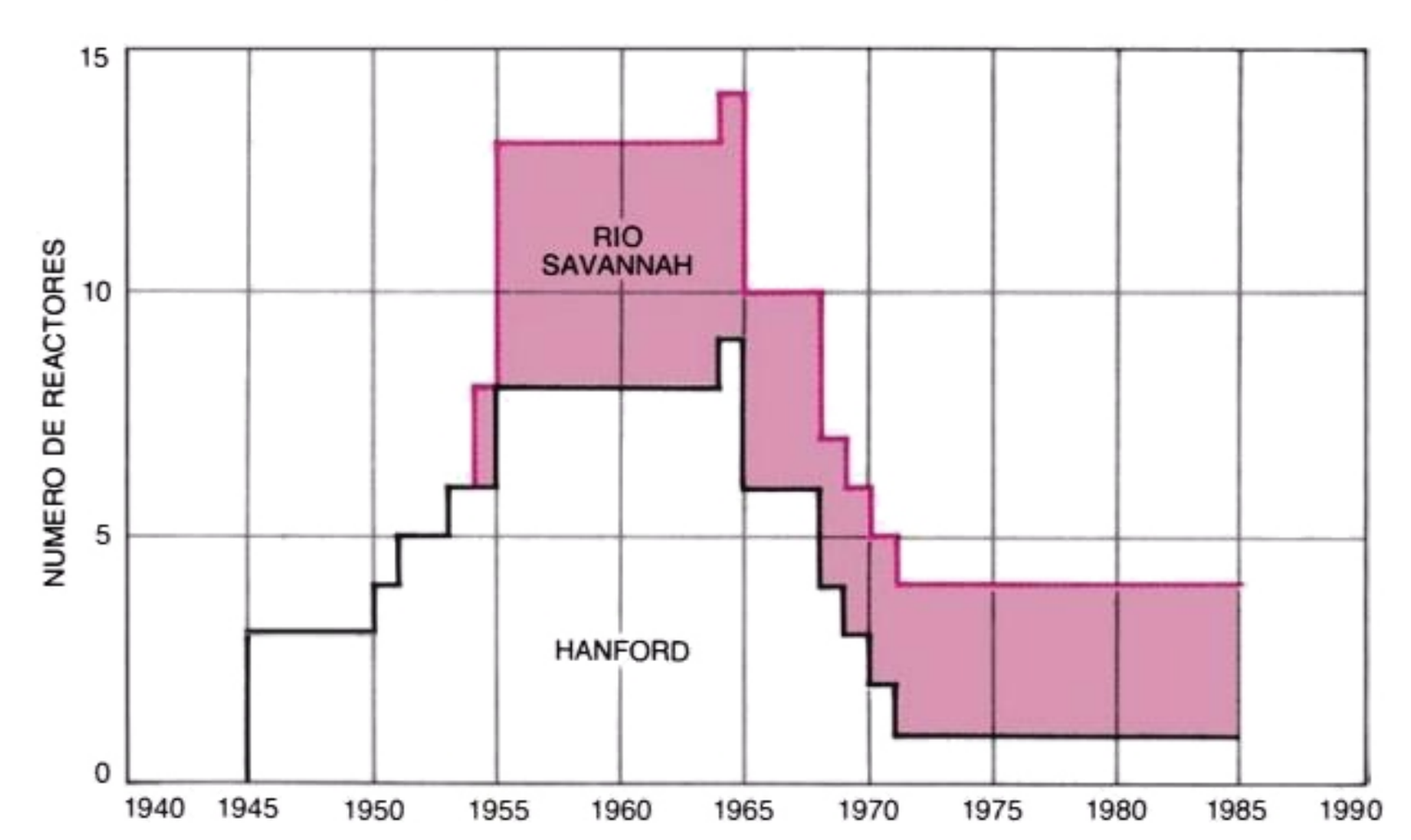
Desde 1954, distintos grupos de in-

vestigadores han realizado mediciones periódicas de la concentración atmosférica de Kr-85 por todo el mundo. Las mediciones más amplias y exactas que se han publicado son las realizadas por Wolfgang Weiss, Albert Sittkus, Helmut Stockburger y Hartmut Sartorius, del Instituto Max Plank de Física Nuclear de Friburgo. Estimando la cantidad de Kr-85 liberado durante todos los ensayos nucleares, así como durante el reprocesamiento de combustible fuera de la URSS, y restando esta cantidad del total de Kr-85 en la atmósfera, se infiere cuánto Kr-85 ha liberado Rusia a la atmósfera [*véase la figura 5*]. Gracias a ello sabemos que durante 1984 la URSS emitió tanto Kr-85 a la atmósfera como los EE.UU. Y si, al igual que en los EE.UU., la mayor parte del Kr-85 soviético procede del reprocesamiento del combustible de reactores productores de plutonio, las cantidades de plutonio existentes en las reservas de ambos países, y el número de sus cabezas nucleares, vendrán a coincidir más o menos. Con una diferencia, el ritmo de producción de plutonio en la URSS es, por lo que se ve, considerablemente mayor que el norteamericano.

Supongamos que las dos superpotencias acuerdan interrumpir la producción de materias fisionables con fines militares. ¿Podría un país verificar adecuadamente que el otro no ha violado el acuerdo? Según los objetivos de nuestro análisis, entenderemos por verificación adecuada la capacidad de detectar en pocos años cualquier actividad clandestina de suficiente entidad encaminada a aumentar las reservas de una de las superpotencias a un ritmo mayor del 1 por ciento anual. Esta restricción o límite tiene su sentido: representa un ritmo de producción de una décima parte del máximo ritmo de producción alcanzado en el pasado. La importancia estratégica de violaciones inferiores sería tan pequeña que resultaría dudoso que las superpotencias optaran por esa ventaja ante el riesgo que implicaría su descubrimiento.

Si tomamos como referencia nuestras estimaciones de las reservas de los EE.UU., un ritmo de crecimiento de un 1 por ciento anual corresponde a la producción de aproximadamente cinco toneladas de uranio apropiado para armas nucleares, o de una tonelada de plutonio. Las violaciones sin detectar, que no traspasaran ese umbral, proporcionarían recursos suficientes para la producción de cientos de ojivas anuales, siendo en términos absolutos bastante significativas e irrelevantes atendiendo al volumen de las reservas existentes.

El problema que plantea la verificación de una suspensión de la producción de materias fisionables, puede dividirse en otros dos subsidiarios: primero, asegurar que no se desvíen cantidades significativas de materias fisionables desde actividades legítimas hacia la producción de armamento; segundo, asegurar que no existan instalaciones bien pertrechadas para la producción clandestina.



4. REACTORES PRODUCTORES DE PLUTONIO que posee los EE.UU. Ese número creció hasta mediados de los años setenta. Tres reactores de Hanford produjeron el plutonio de la bomba arrojada sobre Nagasaki. Dos más estaban en construcción cuando la URSS sometió a prueba su primera arma nuclear en 1949. Poco después se aprobó la construcción de otros tres reactores en Hanford y cinco en el río Savannah. En 1964 terminó la construcción de un reactor "ambivalente", que produce energía eléctrica y plutonio en Hanford. El presidente Johnson decidió suspender la producción de materias fisionables para armas.

Los EE.UU. han dado siempre por supuesto que un acuerdo así debe incluir un sistema de inspecciones "in situ" de las instalaciones que procesan materiales fisionables con fines distintos de la producción de armamento, para asegurarse de que no se desvían cantidades importantes de materiales. Desde 1965, instancias oficiales norteamericanas vienen proponiendo que la inspección se delegara en la Oficina Internacional para la Energía Atómica (OIEA, conocida también por IAEA, de sus siglas en inglés). Esta emplearía técnicas similares a las que utiliza para controlar las materias fisionables en estados que han firmado el Tratado de no proliferación y que se han comprometido a no fabricar armas nucleares.

La verdad es que, dentro de su campaña en favor del Tratado de no proliferación, los EE.UU. se ofrecieron a poner toda su infraestructura nuclear (salvo la que "atañía directamente a la seguridad nacional") bajo el control de la OIEA. En 1980 cristalizó el acuerdo entre los EE.UU. y la OIEA que llevaba a la práctica este ofrecimiento. La Unión Soviética tardó dos años en dar un paso en esa dirección, cuando Gromyko anunció en 1982 que la URSS deseaba colocar algunas de sus instalaciones nucleares pacíficas bajo el control de la OIEA. En marzo pasado concluyó el acuerdo inicial, aunque muy limitado, según el cual la OIEA podrá vigilar una de las dos principales clases de los reactores soviéticos productores de energía. Desgraciadamente, sin embargo, el tipo de reactor que los rusos pusieron en su control no es el que puede utilizarse con mayor facilidad como reactor ambivalente, que produzca tanto energía como plutonio con fines militares.

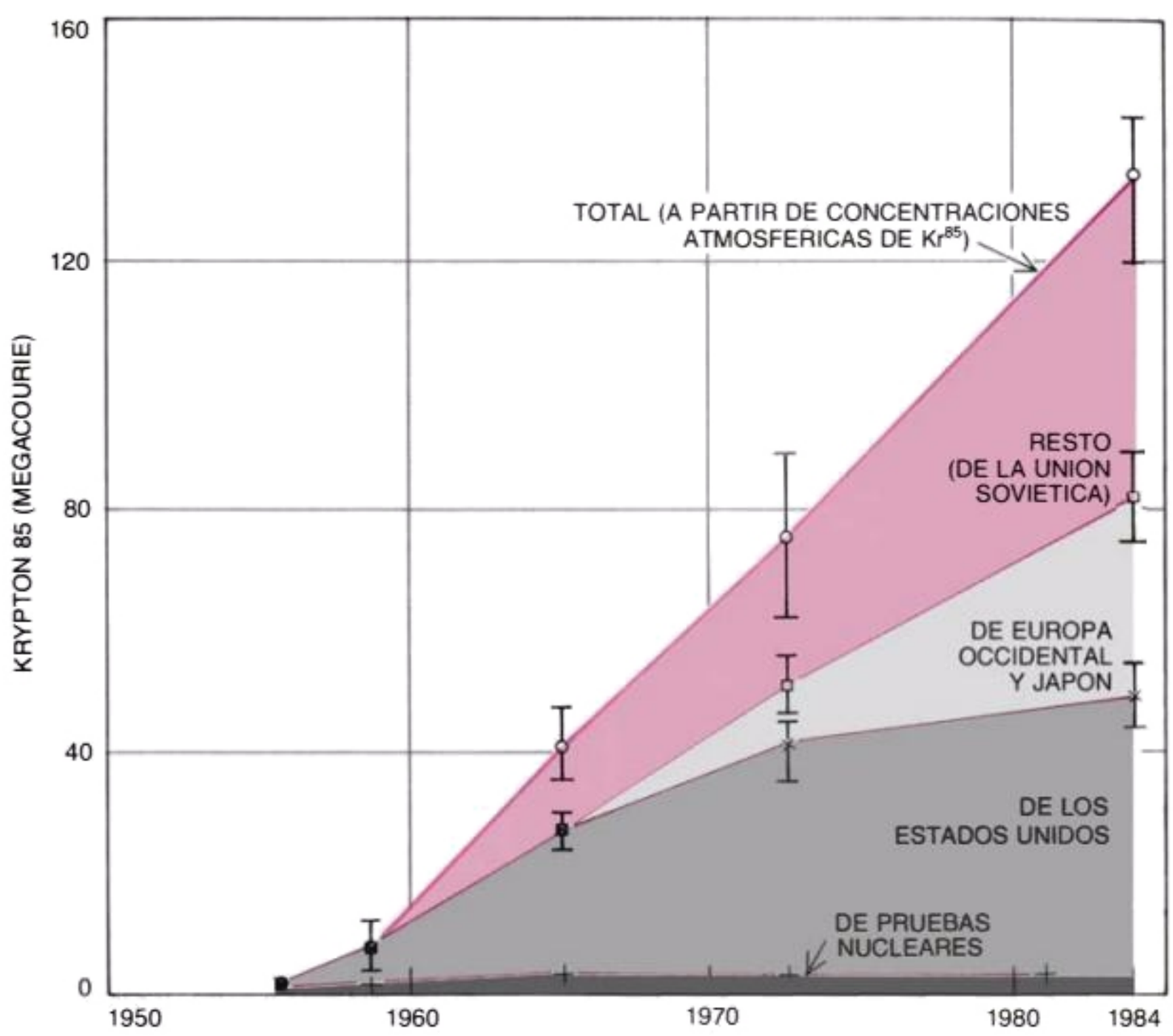
Los controles de la OIEA centuplican varias veces el rigor que se necesitaría para verificar un acuerdo de las superpotencias sobre una interrupcción de la producción de materia nuclear fisionable: están diseñados para detectar en días o meses la desviación de la materia nuclear de una única arma. La OIEA considera significativa la desviación de sólo ocho kilogramos de plutonio o de 25 kilogramos de uranio apropiado para armamento. Por ser ya copiosísimas las reservas nucleares de las superpotencias, las desviaciones de material nuclear deberían multiplicarse por mil para adquirir un significado estratégico potencial. Podría detectarse una desviación inferior, claro está. Los controles de la OIEA deben poder des-

cubrir desviaciones inferiores al 1 por ciento del material fisionable que se mueve a través del sistema nacional de combustible para los reactores nucleares. En un orden comparativo, antes de alcanzar cinco toneladas de U-235 o una tonelada de plutonio anuales, habría que desviar cantidades próximas al 5 por ciento del flujo total en el sistema de energía nuclear de los EE.UU. o bien cercanas al 15 por ciento en el sistema soviético más reducido.

Cumple a los controles de la OIEA confirmar, dentro de una determinada exactitud, que cualquier materia fisionable suministrada o producida en una instalación se encuentra allí, se ha fisionado o se ha transportado a otra instalación bajo control. A este respecto, el problema del seguimiento recuerda al control monetario con que se enfrenta un inspector bancario. Inspectores visitantes de la OIEA comprueban periódicamente la concordancia entre los inventarios reales y los presentados. Se usan medidas de radiación junto con otras medidas no destructivas en puntos de distribución del combustible nuclear, seleccionados al azar, para comprobar que no ha habido sustitución de combustible "falsificado".

La OIEA simplifica su tarea en los lugares de almacenamiento inactivo de la materia fisionable aplicando precintos a prueba de falsificación en los contenedores y en las cámaras, de modo que no sea necesario comprobar su contenido en cada visita. En las áreas de almacenamiento que no pueden precintarse se controlan las actividades sospechosas mediante cámaras a prueba de manipulación. Se han desarrollado sistemas que hacen posible, si es necesario, el control remoto de las imágenes recogidas por estas cámaras en tiempo real.

El ciclo habitual que atraviesa el combustible de los reactores productores de energía en los EE.UU. y en la URSS arranca de la utilización de uranio de bajo enriquecimiento en el combustible puro y termina en el desecho del plutonio del combustible usado. Tal práctica supone otra barrera más para una hipotética desviación de materia fisionable con fines militares. Aun cuando pudiera desviarse suficiente materia fisionable, para convertirla en una forma útil para el armamento, precisaría de un nuevo tratamiento clandestino: el combustible puro de los reactores debería tratarse hasta que alcanzara niveles de enriquecimiento más altos y el combustible usado debería reprocesarse para separar el plutonio de los productos de la fisión, altamente radiactivos. Estos obstáculos persistirán mientras las superpotencias se abstengan de cambiar sus sistemas de energía nuclear a ciclos de combustible que usen plutonio o uranio altamente enriquecido en el combustible puro.



5. EN EL KRYPTON 85 ATMOSFERICO tenemos un indicador de la magnitud de las reservas de plutonio almacenadas en Rusia. Este isótopo lo emiten principalmente las instalaciones de reprocesamiento de combustible nuclear; al no ser químicamente reactivo, permanece en la atmósfera. La curva superior, basada en mediciones pasadas del Kr-85 atmosférico (corregida teniendo en cuenta la desintegración radiactiva), muestra la cantidad total del Kr-85 liberada en todo el planeta a la atmósfera. Las curvas inferiores recogen las estimaciones de los autores acerca de las contribuciones a este total que proceden de pruebas nucleares en todo el mundo y de instalaciones de reprocesamiento fuera de la URSS. El resto (*color*) representa un cálculo de la cantidad de Kr-85 emitido a la atmósfera por las instalaciones de reprocesamiento en el interior de Rusia. Viene a ser parecida a las cantidades producidas por los EE.UU. Probablemente, la mayor parte de estas emisiones norteamericana y soviética proceden de instalaciones productoras de plutonio destinado a usos militares, lo que permite afirmar que las reservas de este material de las superpotencias coinciden.

Bajo una interrupción de la producción de materias fisionables, el U-235 seguiría usándose como combustible no sólo en los reactores de producción de energía, sino también en los reactores de propulsión naval. Los EE.UU. y la URSS tienen más de 100 buques propulsados por reactores nucleares. Los reactores navales de los EE.UU. se alimentan con uranio apropiado para armamento y actualmente se les suministra en torno a cinco toneladas de U-235 anuales. Ya que la potencia total de la marina nuclear soviética viene a ser la que ostenta la norteamericana, y como las naves rusas están en el mar un porcentaje de tiempo mucho menor, es probable que las demandas de U-235 de la flota soviética sean inferiores.

No hay que pensar en que ninguna marina autorice la presencia de observadores internacionales en sus barcos, ni en las instalaciones que producen combustible para sus reactores. Un posible convenio entre las superpotencias a este respecto acordaría la cantidad de U-235 que cada parte estaría autorizada a producir para el abastecimiento de sus reactores navales. Según tal acuerdo hipotético, el U-235 se produciría en plantas controladas, y debería devolverse, a otra instalación controlada, una cantidad equivalente de uranio enriquecido irradiado, después de transcurrido cierto intervalo de tiempo. Estas cautelas velarían por la posible desviación acumulativa de cantidades significativas de U-235 naval para usos armamentísticos.

Los EE.UU. tienen tantos reactores de investigación como reactores navales, pero su demanda de U-235 es apro-

ximadamente una décima parte mayor. No hay ningún motivo para pensar que la correspondiente demanda de la Unión Soviética con estos fines sea muy superior. Comparado con el volumen que constituye una violación significativa, esta cantidad corresponde a un movimiento pequeño de materia fisionable (aproximadamente media tonelada anual). En cualquier caso, la OIEA ha desarrollado controles exhaustivos para detectar desviaciones procedentes de los reactores de investigación.

La última clase de reactores cuyo ciclo de combustible debe protegerse son los productores de tritio. Este isótopo proporciona los neutrones que inician la reacción de fisión en cadena y "aumenta" los rendimientos de la fisión de las armas nucleares de los EE.UU. También es la fuente de la mayor parte de neutrones producidos por la "bomba de neutrones". Se produce tritio cuando el litio 6 absorbe neutrones en el mismo tipo de reactor que produce plutonio cuando el U-238 atrapa neutrones.

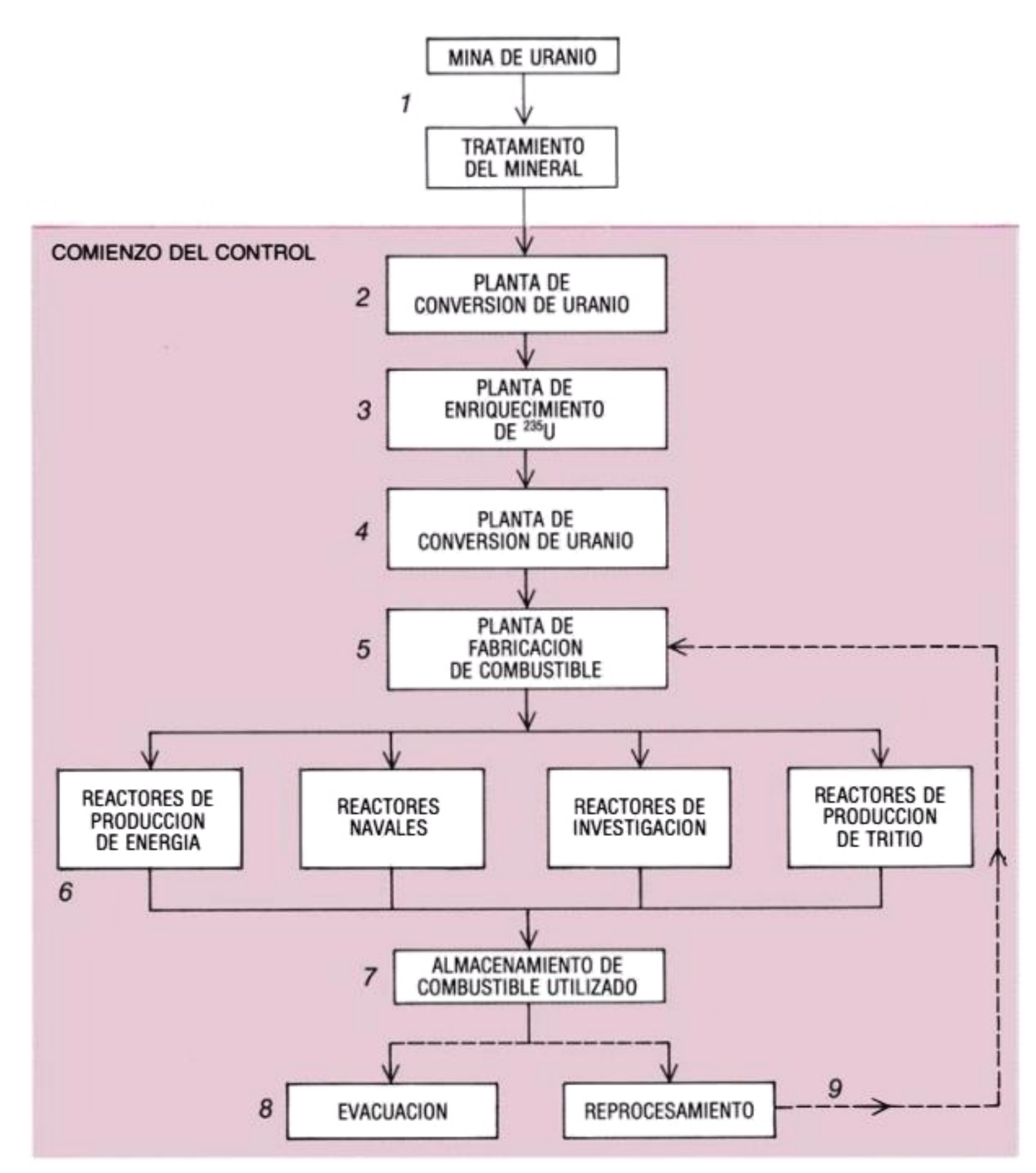
Incluso estando congeladas las reservas de materias fisionables, dada la vida media radiactiva del tritio (12 años), éste debe reemplazarse periódicamente. Proceso que no representa, sin embargo, ningún esfuerzo a gran escala. Una cantidad de tritio semejante a la de la reserva nuclear de los EE.UU. podría mantenerse quizá con la capacidad de uno de los reactores del río Savannah. Tal reactor, como cualquier otro, se controlaría al objeto de evitar la producción clandestina de materia fisionable con fines militares.

Si los reactores legales y sus ciclos de combustible pueden controlarse, previniendo así una desviación significativa de materias destinada a las armas nucleares, ¿cuáles son las posibilidades de que el otro bando construya con éxito una instalación clandestina de producción de materias fisionables? En las primeras propuestas en favor de la suspensión de la producción de materias fisionables presentadas por los EE.UU., cada superpotencia debía desplegar equipos móviles de observadores que vigilaran el territorio contrario. Esta propuesta resultó inaceptable para la Unión Soviética. Fue altamente significativo el hecho de que, en 1969, los EE.UU. eliminaran de plano esta exigencia. ¿A que obedeció tan drástico cambio de posición?

Parte de la respuesta está en que, ya entonces, los satélites de vigilancia daban garantías al gobierno de los EE.UU. de que podría detectarse desde el espacio una producción clandestina en gran escala. La vigilancia rutinaria de la Unión Soviética mediante satélites empezó en 1961, y desde 1969 era susceptible de observación pormenorizada el exterior de cualquier construcción levantada sobre la superficie terrestre.

Puede también obtenerse información de la intensidad de energía de las actividades ocultas mediante telescopios sensibles a la radiación infrarroja emitida por las superficies calientes. Cuando los datos de los satélites de vigilancia se analizan en combinación con la información recogida en boletines internos, obtenidos a partir de transmisiones de radio y de microondas y de entrevistas con emigrantes, el producto resultante es sorprendente. Esto se viene demostrando de una manera convincente en el anuario que publica el Departamento de Defensa dedicado a la potencia militar soviética.

Es improbable que una superpotencia pueda hurtar a ese examen la existencia de un programa de entidad suficiente como para producir una tonelada de plutonio o cinco de uranio altamente enriquecido cada año. Tal programa tendría muchas posibilidades de ser descubierto. A modo de comparación, la construcción de reactores productores de plutonio y sus correspondientes instalaciones de reprocesamiento de combustible equivaldrían a empresas de miles de millones de dólares. Si añadimos los miles de trabajadores que se verían involucrados en tales actividades, se advierte cuán difícil sería ocultar la naturaleza de un esfuerzo de esta magnitud.



6. LAS ACTIVIDADES A CONTROLAR para asegurar el cumplimiento de la suspensión de la producción de materias fisionables empiezan cuando el uranio deja la fábrica donde se extrae el óxido de uranio del mineral de uranio puro (*1*). En una planta de transformación (*2*), el óxido de uranio se convierte en gas (fluoruro de uranio) y puede ser enriquecido (*3*). Entonces, se convierte de nuevo en un óxido o en un metal (*4*) elaborado en el combustible de un reactor (*5*). Una vez usado (*6*), el combustible se almacena junto al reactor (*7*). De allí puede enviarse a un depósito de residuos radiactivos (*8*) o a una central de reprocesamiento (*9*), donde puede reciclarse y recobrarse todo el uranio y el plutonio fisionable que contiene (*recuadro cinco*).

7. SE ENRIQUECE EL URANIO pasándolo a través de una "cascada" de centrífugas. Cada unidad (cilindro) viene a ser de la altura de una persona. Esta es la instalación de enriquecimiento de uranio de uso comercial menos llamativa. Consume menos energía que una planta de enriquecimiento por difusión y no requiere tantas etapas de enriquecimiento; ni tampoco sobresale por nada especial. Ahora bien, la construcción de una planta de enriquecimiento centrífuga podría detectarse mediante un servicio idóneo de información. Para producir cinco toneladas anuales de uranio con fines militares (cantidad definida por los autores de este artículo como representativa de una violación significativa de un acuerdo de interrupción), se necesitarían unas 100.000 centrífugas.

Asimismo, se necesitaría una gran cantidad de uranio, del orden de las mil toneladas de uranio natural. Aunque no constituye en sí ningún volumen exagerado, sí corresponde a una fracción significativa del movimiento de uranio proyectado en cualquiera de los sistemas de energía nuclear de las superpotencias. Costaría esconder la desviación de tanto uranio de extracción reciente, sobre todo si las fábricas para el tratamiento de minerales de uranio quedan sometidas a algún tipo de control "in situ".

Sin embargo, la detección de las instalaciones de producción clandestina a través de sus actividades asociadas de excavación y de tratamiento tiene sus limitaciones: un programa de producción clandestina podría abastecerse de uranio años enteros, a partir de una reserva establecida con anterioridad. Los EE.UU. han almacenado cientos de toneladas de U-235 usado, natural y débilmente enriquecido. Lo más seguro es que Rusia disponga de reservas similares. Es obligada la suposición de una posible ocultación de reserva de uranio de hasta 100 toneladas de U-235 antes de entrar en vigor un acuerdo sobre la suspensión de la producción de materias fisionables.

Otra forma de detectar plantas de producción clandestina consistiría en la búsqueda de las emisiones características de su funcionamiento. El más claro ejemplo de tales emisiones lo tenemos en la enorme cantidad de calor generado por los reactores productores de plutonio. Un conjunto de reactores clandestinos capaces de producir una tonelada anual de plutonio disiparía, en promedio, tres millones de kilowatt de energía térmica. Cantidad de calor que equivale a la generada por una ciudad norteamericana de 300.000 habitantes. No sería tarea fácil deshacerse de tanto calor sin ser detectado, toda vez que existen sensores que descubren, desde el espacio, la presencia o ausencia de aislamiento térmico en una casa unifamiliar.

La figura 1 muestra una fotografía en el infrarrojo térmico, captada desde un avión, del desagüe del agua caliente de los reactores de producción del río Savannah, cada uno de los cuales tiene una producción de energía térmica aproximadamente de 1,5 millones de kilowatt. Imágenes parecidas pueden obtenerse desde altitudes de satélite. Aunque puede intentarse reducir las emisiones en el infrarrojo térmico del agua caliente, mezclándola, por ejemplo, con el caudal de un gran río, el problema del ocultamiento sería arduo y los propios esfuerzos desarrollados darían pie a sospechar de la naturaleza de la empresa.

De entre las instalaciones capacitadas para producir materias fisionables apropiadas para armas nucleares, las menos visibles son quizá las denominadas plantas de enriquecimiento en centrífugas. Esta técnica, que empieza ahora a abrirse camino en el sector comercial, usa cilindros de gas de uranio que giran en máquinas centrífugas; para alcanzar un determinado nivel de enriquecimiento, se necesita un número considerablemente inferior de etapas comparado con el utilizado en una planta de difusión. Además, las plantas centrífugas son menores y no consumen tanta energía. La apariencia de una planta de gas centrífuga no es tan definida como la de las de difusión y no se las identifica sólo con las fotografías desde satélites. Pero un trabajo de información riguroso lograría descubrirlas, recogiendo indicios del enorme esfuerzo que requiere el manufacturar e instalar el gran número de centrífugas que se necesita para producir cada año cinco toneladas de uranio altamente enriquecido [*véase la figura 7*].

El Departamento de Energía anunció recientemente que sus futuras instalaciones de enriquecimiento de uranio utilizarían una nueva técnica de-

nominada separación de isótopos por láser. Se funda en que los niveles de energía de los electrones atómicos del U-235 y el U-238 son ligeramente distintos, dada la diferencia entre las masas de sus núcleos atómicos. Para separar los isótopos se ajusta un conjunto de láseres de suerte que produzcan la energía que pueden absorber los átomos de U-235 (cada uno de los cuales pierde un electrón en el proceso), pero no los átomos de U-238. Un campo eléctrico separa entonces los iones de U-235, cargados, de los átomos neutros de U-238.

Una planta de enriquecimiento basada en la separación de isótopos por láser sería menor que una planta centrífuga; por consiguiente, costaría más descubrirla en fotografías tomadas desde satélites. Ahora bien, la construcción de una planta de enriquecimiento por láser capaz de producir cinco toneladas anuales de uranio con fines militares costaría cientos de millones de dólares e incorporaría láseres de pulsos rápidos y de alta potencia, inusuales. Estos y otros hechos facilitarían la detección de tal planta con un buen servicio de información.

Aunque cada uno de los medios de detección que hemos analizado puede, en teoría, eludirse, la producción clandestina de materias fisionables requeriría que la construcción y el funcionamiento de todas las instalaciones importantes permanecieran ocultos varios años. La detección de una instalación sospechosa por cualquiera de los medios de vigilancia y de inteligencia amenazaría la empresa entera.

Las pruebas sospechosas de actividades de producción clandestina podrían llevarse ante un comité organizado según las líneas de la Comisión Consultiva Permanente, que se estableció originalmente para dirimir cuestiones relacionadas con el cumplimiento del tratado SALT I de 1972. En ausencia de una explicación satisfactoria se podrían exigir inspecciones "in situ", tal como fue acordado entre los EE.UU., la URSS y Gran Bretaña en el caso de las pruebas nucleares subterráneas, antes de la suspensión de las negociaciones para un Tratado de Prohibición de Pruebas Nucleares. La obstrucción sistemática de los trabajos destinados a obtener respuesta de las denuncias cuestionarían, naturalmente, la continuidad del acuerdo de suspensión de la producción de materias fisionables.

Por otra parte, la recompensa que se obtendría de la ocultación de un programa de producción clandestino no sería espectacular; incrementaría acaso ligeramente la magnitud de las reservas de materias fisionables, excesivo ya.

Si las superpotencias llegan a un acuerdo que prohíba la producción de materias fisionables con fines militares, se intentará comprometer luego en esa vía a los demás estados con capacidad para desarrollar armamento nuclear y persuadir a las naciones que no la tengan y que no hayan firmado el Tratado de no proliferación a hacerlo. Una suspensión sometida a control estaría también en la base de reducciones verificables de las cantidades de materias fisionables que figuran en los arsenales de los estados que poseen armas nucleares.

La forma obvia de desprenderse de las materias fisionables sería "quemarlas" en los reactores de energía nuclear ya existentes. El uranio apropiado para armamento perdería su valor militar una vez diluido con uranio usado o uranio natural hasta alcanzar sólo el nivel de enriquecimiento requerido por el combustible de los reactores de energía nuclear. Las reservas de plutonio apropiado para armamento deberían utilizarse con mayor cuidado, ya que no existe un desnaturalizante natural para él. Entre otras opciones, podría usarse el plutonio como combustible en los reactores más o menos conocidos que funcionan en un "solo sentido" (es decir, sin reprocesar el combustible). De esta forma, diez grandes reactores podrían desprenderse de todo el plutonio de las armas estadounidendes o soviéticas en una década.

Como las superpotencias pueden estimar con bastante aproximación sus mutuas reservas de materias fisionables, no hay ninguna razón por la que no puedan, en razón de esos cómputos, negociar reducciones del 50 por ciento o más de sus arsenales. Cumplida esa mengua, las pequeñas violaciones del acuerdo revestirían mayor importancia, y por tanto se haría necesario un mayor intercambio de información y unos métodos más refinados de análisis para establecer las bases que apuntalaran otro recorte ulterior.

Pero tampoco hay motivos para retrasar las acciones que puedan llevarse a cabo de inmediato. Si las superpotencias están dispuestas a aceptar inspecciones y otros controles en el desenvolvimiento de sus actividades nucleares que no guarden relación con el armamento, tanto la suspensión de la producción de materias fisionables con fines militares como las reducciones de las cantidades de materias fisionables ya en reserva podrían verificarse de un modo satisfactorio.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

SUSPENSION DE LA PRODUCCION DE MATERIAL FISIONABLE

CONTROLLING THE SOURCE: VERIFICATION OF A CUTOFF IN THE PRODUCTION OF PLUTONIUM AND HIGHLY ENRICHED URANIUM FOR NUCLEAR WEAPONS. Frank von Hippel y Barbara G. Levi. Informe n.º PU/CEES 167, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University; 1984.

US AND SOVIET STOCKPILES OF FISSILE MATERIALS. Frank von Hippel, David Albright y Barbara G. Levi. Informe n.º PU/CEES 168, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University; 1984.

HELIOSISMOLOGIA

SOLAR ROTATION. R. F. Howard en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics,* vol. 22, págs. 131-155; 1984.

SEISMOLOGY OF THE SUN. J. Christensen-Dalsgaard, D. O. Gough y J. Toomre en *Science*. En prensa.

SOLAR WAVES AND OSCILLATIONS. T. M. Brown, B. W. Mihalas y E. J. Rhodes, Jr., en *Physicis of the Sun,* dirigido por P. A. Sturrock, T. E. Holzer, D. Mihalas y R. K. Ulrich. D. Reidel Publishing Co. En prensa.

OLIGOSACARINAS

STRUCTURE AND FUNCTION OF THE PRIMARY CELL WALLS OF PLANTS. Michael McNeil, Alan G. Darvill, Stephen C. Fry y Peter Albersheim en *Annual Review of Biochemistry,* vol. 53, págs. 625-663; 1984.

MANIPULATION OF THE MORPHOGENETIC PATHWAYS OF TOBACCO EXPLANTS BY OLIGOSACCHARINS. Kiem Tran Thanh Van, Patrick Toubart, Alain Cousson, Alan G. Darvill, David J. Gollin, Paulanne Chelf y Peter Albersheim en *Nature,* vol. 314, n.º 6012, pág. 615-617; 18 de abril de 1985.

ORGANIZACION COMPARTIMENTADA DEL APARATO DE GOLGI

INTERCOMPARTMENTAL TRANSPORT IN THE GOLGI COMPLEX IS A DISSOCIATIVE PROCESS: FACILE TRANSFER OF MEMBRANE PROTEIN BETWEEN TWO GOLGI POPULATIONS. James E. Rothman, Ronald L. Miller y Lenore J. Urbani en *The Journal of Cell Biology,* vol. 99, n.º 1, parte 1.ª, págs. 260-271; julio, 1984.

ATTACHMENT OF TERMINAL N-ACETYLGLUCOSAMINE TO ASPARAGINELINKED OLIGOSACCHARIDES OCCURS IN THE CENTRAL CISTERNAE OF THE GOLGI STACK. William G. Dunphy, Ruud Brands y James E. Rothman en *Cell,* vol. 40, n.º 2, págs. 463-472; febrero, 1985.

CATALIZADORES BIMETALICOS

SUPPORTED "BIMETALLIC CLUSTER" CATALYSTS. J. H. Sinfelt en *Journal of Catalysis,* vol. 29, n.º 2, págs. 308-315; mayo, 1973.

CATALYSIS BY ALLOYS AND BIMETALLIC CLUSTERS. John H. Sinfelt en *Accounts of Chemical Research,* vol. 10, n.º 1, págs. 15-20; enero, 1977.

BIMETALLIC CATALYSIS: DISCOVERIES, CONCEPTS, AND APPLICATIONS. John H. Sinfelt. John Wiley & Sons, Inc., 1983.

UNA ARAÑA SALTADORA QUE TEJE

THE PRINCIPAL EYES OF A JUMPING SPIDER HAVE A TELEPHOTO COMPONENT. David S. Williams y Peter McIntyre en *Nature,* vol. 288, n.º 5791, págs. 578-580; 11 de diciembre de 1980.

THE BIOLOGY OF *PORTIA FIMBRIATA*, A WEB-BUILDING JUMPING SPIDER (ARANEAE, SALTICIDAE) FROM QUEENSLAND: INTRASPECIFIC INTERACTIONS. R. R. Jackson en *Journal of Zoology*. En prensa.

LAPSUS LINGUAE

COVERT FORMULATION AND EDITING OF ANOMALIES IN SPEECH PRODUCTION: EVIDENCE FROM EXPERIMENTALLY ELICITED SLIPS OF THE TONGUE. Michael T. Motley, Carl T. Camden y Bernard J. Baars en *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior,* vol. 21, n.º 5, págs. 578-594; octubre, 1982.

EXPERIMENTAL VERBAL SLIP STUDIES: A REVIEW AND AN EDITING MODEL OF LANGUAGE ENCODING. Michael T. Motley, Bernard J. Baars y Carl T. Camden en *Communication Monographs,* vol. 50, n.º 2, págs. 79-101; junio, 1983.

COMPORTAMIENTO CROMOSOMICO

GENETIC CONTROL OF CHROMOSOME PAIRING IN WHEAT. E. R. Sears en *Ann. Rev. Genet.,* vol. 10, págs. 31-51; 1976.

INTERACTION BETWEEN RYE B-CHROMOSOMES AND WHEAT GENETIC SYSTEMS CONTROLLING HOMOEOLOGOUS PAIRING. C. Romero y J. R. Lacadena en *Chromosoma,* vol. 80, págs. 33-48; 1980.

GENETICA. J. R. Lacadena. Ed. AGESA; Madrid, 1981.

SUPRACHROMOSOMAL ORGANIZATION: CYTOGENETICAL RATIONALE AND EXPERIMENTAL EVIDENCE. J. R. Lacadena, B. Jódar y E. Ferrer en *Kew Chromosome Conference II,* dirigido por P. A. Brandham y M. D. Bennett, págs. 81-90. George Allen & Unwin; Londres, 1983.

NUCLEOLAR ORGANIZER ACTIVITY IN WHEAT, RYE AND DERIVATIVES ANALYZED BY A SILVER-STAINING PROCEDURE. M. C. Cermeño, J. Orellana, J. L. Santos y J. R. Lacadena en *Chromosoma,* vol. 89, págs. 370-376; 1984.

NUCLEOLAR ORGANIZER ACTIVITY AND COMPETITION IN THE GENUS *AEGILOPS*. M. C. Cermeño, J. Orellana, J. L. Santos y J. R. Lacadena en *Heredity,* vol. 53, págs. 603-611; 1984.

JUEGOS DE ORDENADOR

STRUCTURE AND INTERPRETATION OF COMPUTER PROGRAMS. Harold Abelson, Gerald Jay Sussman y Julie Sussman. The MIT Press, 1985.

HARDWARE/SOFTWARE TRADE-OFFS FOR BITMAP GRAPHICS ON THE BLIT. Rob Pike, Bart Locanthi y John Reiser en *Software—Practice and Experience,* vol. 15, n.º 2, págs. 131-151; febrero, 1985.

TALLER Y LABORATORIO

STREAM MEANDERS ON A SMOOTH HYDROPHOBIC SURFACE. Takeo Nakagawa y John C. Scott en *Journal of Fluid Mechanics,* vol. 149, págs. 89-99; diciembre, 1984.

ON THE ABILITY OF DROPS OR BUBBLES TO STICK TO NON-HORIZONTAL SURFACES OF SOLIDS, PART 2: SMALL DROPS OR BUBBLES HAVING CONTACT ANGLES OF ARBITRARY SIZE. E. B. Dussan V. en *Journal of Fluid Mechanics,* vol. 151, págs. 1-20; 1985.

Número 110
Noviembre 1985

INVESTIGACION Y CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

12 **SUSPENSION DE LA PRODUCCION DE MATERIAL FISIONABLE, Frank von Hippel, David H. Albright y Barbara G. Levi** Contribuiría a un control más estrecho de los arsenales.

22 **HELIOSISMOLOGIA, John W. Leibacher, Robert W. Noyes, Juri Toomre y Roger K. Ulrich**
¿Cómo llegar desde las oscilaciones observadas en la superficie hasta el núcleo solar?

34 **OLIGOSACARINAS, Peter Albersheim y Alan G. Darvill**
Fragmentos de la pared celular vegetal intervienen en el control de funciones vitales.

48 **ORGANIZACION COMPARTIMENTADA DEL APARATO DE GOLGI, James E. Rothman**
Se conocen tres subdivisiones, empeñadas en diferentes modificaciones de las proteínas.

64 **CATALIZADORES BIMETALICOS, John H. Sinfelt**
Minúsculos racimos de átomos metálicos regulan la velocidad de las reacciones químicas.

74 **UNA ARAÑA SALTADORA QUE TEJE, Robert R. Jackson**
A diferencia de la mayoría de especies saltadoras, *Portia fimbriata* teje sus propias redes.

84 **LAPSUS LINGUAE, Michael T. Motley**
Permiten vislumbrar el proceso que subyace bajo una de las conductas más complejas: el habla.

92 **COMPORTAMIENTO CROMOSOMICO, Juan-Ramón Lacadena**
Asegura la conservación, transmisión y expresión de la información genética en la especie.

4 AUTORES

6 HACE...

44 CIENCIA Y SOCIEDAD

104 JUEGOS DE ORDENADOR

110 TALLER Y LABORATORIO

116 LIBROS

124 BIBILIOGRAFIA

SCIENTIFIC AMERICAN

COMITE DE REDACCION Jonathan Piel (Presidente y director), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, Peter G. Brown, Ari W. Epstein, Michael Feirtag, Robert Kunzig, Philip Morrison, James T. Rogers, Armand Schwab, Jr., Joseph Wisnovsky

DIRECCION ARTISTICA Samuel L. Howard
PRODUCCION Richard Sasso
DIRECTOR GENERAL George S. Conn

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Carlos Oppenheimer
José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Los autores

FRANK VON HIPPEL, DAVID H. ALBRIGHT y BARBARA G. LEVI ("Suspensión de la producción de material fisionable") son físicos del Centro de Estudios Ambientales y de la Energía (CEES) de la Universidad de Princeton. Von Hippel se licenció en física por el Instituto de Tecnología de Massachussetts, doctorándose en física teórica por la Universidad de Oxford. Presidió la Federación de Científicos Americanos (FAS) y hoy pertenece al consejo directivo del *Bulletin of the Atomic Scientist.* Albright trabajó en la CEES y en la oficina de Washington de la FAS. Licenciado en matemáticas por la Universidad de Wright y en física por la de Indiana fue asesor del Instituto de Política Ambiental y posteriormente enseñó física en la Universidad George Mason. En 1983 se incorporó a la FAS y, en 1984, se afilió al CEES. Levi se formó en el Carleton College; es doctora por la Universidad de Stanford. Redactora desde 1969 de *Physics Today,* dictó cursos de matemáticas y física, desde 1970 hasta 1976, en la Universidad Fairleigh Dickinson; de 1977 a 1981 fue profesora de física del Instituto de Tecnología de Georgia.

JOHN W. LEIBACHER, ROBERT W. NOYES, JURI TOOMRE y ROGER K. ULRICH ("Heliosismología") investigan la estructura física del Sol. Leibacher es astrónomo del Observatorio Solar de los Estados Unidos. Formado en la Universidad de Harvard, trabajó en diversos laboratorios astrofísicos, entre ellos el Laboratorio de Physique Stellaire et Planétaire, de Francia, antes de acceder a su actual cargo, en 1983. Noyes es profesor de astronomía de Harvard y astrofísico del Observatorio Astrofísico Smithsoniano. Licenciado por el Haverford College (1957), se doctoró por el Instituto de Tecnología de California en 1963. Desde 1962, cuando ingresó en el cuerpo docente de Harvard, ha estado agregado al Observatorio Smithsoniano, cuyo centro de astrofísica dirigió desde 1973 hasta 1980. Es codescubridor de la "oscilación de cinco minutos" del Sol. Toomre enseña en la Universidad de Colorado en Boulder, a cuyo Instituto de Astrofísica pertenece. Cursó estudios en el Instituto de Tecnología de Massachussets y en Cambridge, donde se doctoró en 1967. Ulrich es catedrático de astronomía de la Universidad de California en Los Angeles (UCLA). Formado en Berkeley, investigó sobre los neutrinos solares en el Instituto de Tecnología de California antes de su ingreso en UCLA.

PETER ALBERSHEIM y ALAN G. DARVILL ("Oligosacarinas") acaban de ocupar las plazas de director y subdirector, respectivamente, del recién creado Centro para la Investigación de Carbohidratos Complejos de la Universidad de Georgia. Albersheim se licenció en patología vegetal por la Universidad de Cornell en 1956, recibiéndose de doctor en bioquímica por el Instituto de Tecnología de California en 1959. Tras cinco años de docencia en la Universidad de Harvard se incorporó a la de Colorado en Boulder, alcanzando la cátedra de biología molecular, celular y del desarrollo en 1970. Darvill se licenció en biología vegetal por el Politécnico de Wolverhampton en 1973; es doctor en fisiología vegetal por el Colegio Universitario de Gales (1976); desde ese año, y hasta su reciente nombramiento en Georgia, ha permanecido en la Universidad de Colorado.

JAMES E. ROTHMAN ("Organización compartimentada del aparato de Golgi") enseña bioquímica en la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford. En 1976 se doctoró por la Facultad de Medicina de Harvard. Tras dos años de becario del Instituto de Tecnología de Massachusetts ingresó en el cuerpo docente de Stanford.

JOHN H. SINFELT ("Catalizadores bimetálicos") es asesor científico de la compañía Exxon. Tras licenciarse en ciencias (1951) por la Universidad estatal de Pennsylvania, se trasladó a la de Illinois en Urbana-Champaign, por la que es doctor en ingeniería química (1954).

ROBERT R. JACKSON ("Una araña saltadora que teje") es catedrático del departamento de zoología de la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda. Nació y se educó en los Estados Unidos, donde investigó en la Universidad estatal de Carolina del Norte y se doctoró en zoología por la de California en Berkeley, en 1976. Después de dedicar un año a la investigación en el departamento de Salud Mental de Carolina del Norte se trasladó a Nueva Zelanda, donde en la actualidad enseña comportamiento animal y biología evolutiva.

MICHAEL T. MOTLEY ("Lapsus linguae") es profesor de comunicación del departamento de retórica de la Universidad de California en Davis. Cursó los estudios universitarios en Texas, interesándose por la psicolingüística. Preparaba su tesis doctoral sobre comunicación cuando se decidió por los *lapsus* verbales. En 1970 se recibió por la Universidad estatal de Pennsylvania.

JUAN RAMON LACADENA ("Comportamiento cromosómico"), doctor ingenerio agrónomo, es catedrático y director del departamento de genética en la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Complutense de Madrid. Inició su investigación en 1961 como colaborador científico en la Estación Experimental de Aula Dei, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en Zaragoza, trabajando en citogenética aplicada de cereales. En 1968 pasó a la Universidad Complutense como profesor agregado, accediendo a catedrático en 1971. Con su paso a la universidad sus líneas de investigación se concentraron más en temas de ciencia básica, estudiando diversos aspectos del comportamiento de los cromosomas.